بررسی نقش ضریب اصطکاک و نیروی نگهدارنده در فرآیند بازگشت فنری در خمش U شکل ورق‌های غیر ایزوتروپ*

«یادداشت پژوهشی»

مهران کدخدایان(۱) ریحانه‌ی اکبری(۲)

چکیده *در فرآیندهای شکل دهی ورق‌های فلزی، پیش بینی دقیق میزان بازگشت فنری برای طراحی ابزار شکل دهی، بسیار ضروری می‌باشد. در بسیاری از عملیات شکل دهی که قطعه تحت بارگذاری‌های مختلفی است، شکل پیچیده ای از بازگشت فنری اتفاق می افتد. علت این پدیده، حذف بخش الاستیک کرنش‌های داخلی در طول عملیات بار برداری می‌باشد. در فرآیند شکل دهی U شکل صفحات، قطعه در ابتدا تحت کشش وخمش و سپس رها سازی از آن‌ها قرار می‌گیرد؛ از این رو، شکل نسبتاً پیچیده ای از بازگشت فنری و انحنای دیواره‌ی جانبی در آن رخ می دهد. در این مقاله، خمش U شکل یک ورقه فولادی با استحکام بالا و دارای خاصیت غیر ایزوتروپی نرمال با نرم افزار ELFEN شبیه سازی گردیده است و تأثیر عواملی مانند ضریب اصطکاک و نیروی نگهدارنده بر میزان بازگشت فنری و انحنای دیواره‌ی جانبی، مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که تأثیرات ضریب اصطکاک و نیروی نگهدارنده‌ی قطعه کار در این فرآیند، قابل توجه می‌باشد؛ به طوری که با افزایش آن‌ها در ابتدا مقادیر برگشت فنری و انحنای دیواره‌ی جانبی افزایش می‌یابد، ولی پس از رسیدن به حداکثر خود، مجدداً کاهش می یابد.*

واژه‌های کلیدی بازگشت فنری، غیر ایزوتروپ، شبیه سازی، ضریب اصطکاک، نیروی نگهدارنده.

An Investigation into the Effect of Friction and Blank Holden Force on the Springblak of U-bending of an Isotropic Plates

M. Kadkhodayan R. Akbary

Abstract *Accurate prediction of springback is essential for the design of tools used in sheet metal forming. One of the major causes for the production of inconsistent part is springback, the elastic recovery in the material after the tooling is removed. In this paper, the numerical simulation of springback and side wall curl in U-bending has been performed. This operation presents a complex form of springback and side wall curl occurring in sheet metal forming since the sheet undergoes stretching, bending and unbending deformations. The effects of some parameters such as coefficient of friction and blank-holder force on the springback and side wall curl are studied. The results show that the role of friction and blank-holder force in the U-bending process is considerable. For instance, springback and side-wall curl initially increase with raising the coefficient of friction and blank-holder force but they decrease again when they go beyond certain values.*

Key Words Springback, Anisotropy, Simulation, Friction Coefficient, Blank-Holder Force.

---

* نسخه‌ی اول مقاله در تاریخ ۸۳/۳/۱۱ و نسخه‌ی نهایی آن در تاریخ ۸۷/۱۰/۲۸ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) نویسنده‌ی مسئول، دانشیار، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

(۲) کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی، دانشگاه فردوسی مشهد

مقدمه

در فرآیندهای شکل دهی ورق‌های نازک فلزی، یکی از عوامل بسیار مـؤثر بـر کیفیـت قطعـه‌ی کـار، پدیـده‌ی بازگشت فنـری (Springback) اسـت. ایـن پدیـده بـه صورت تغییر در شکل قطعـه‌ی کـار، بعـد از برداشـتن ابزار، نمایان می‌گردد و برای موادی که نسبت مقاومـت ماده به مدول الاستیسیته آن‌ها بالاتر است (مانند فولاد با استحکام بالا)، محسوس تر می‌باشد.

محققین بسیاری پدیده‌ی بازگشت فنری را برای ورقه‌های ایزوتروپ مورد مطالعه قرار داده اند[1-4]. در برخی از این بررسی‌ها به منظور اسـتفاده از روش‌هـای تحلیلی به ناچار از فرضیات سـاده کننـده‌ی بـسیاری از قبیل وجود رابطه‌ی ساده بین تنش و کرنش، عدم وجود اصـطکاک، نادیـده گـرفتن کـم شـدن ضـخامت مـاده، چشم‌پوشی از اثر بوشینگر و بزرگ بودن شـعاع خمـش در مقایسه با ضخامت استفاده شده است.

بـا نـوآوری‌هـایی کـه در سـال‌هـای اخیـر در فرآیندهای شکل‌دهی صفحات نازک ایجاد شده است و تأکیدی که بر طراحی قطعات بـا کـم‌تـرین وزن وجـود دارد، نیـاز بـه مـواد بـا اسـتحکام بـالا و یـا نـوارهـای کامپوزیتی با خواص متنوع افزایش یافته اسـت. در ایـن راستا یوئن(Yuen) رابطه ای را برای شعاع خمش بعـد از بازگشت فنری، برای نوارهـای چنـدین لایـه، تعیـین نمود[5]. پس از آن لیو(Leu) روشی را برای محاسبه‌ی بازگشت فنری و قابلیـت خمـش در حالـت الاسـتیک-پلاسـتیک ورقـه‌هـای فلـزی غیرایزوتـروپ در شـرایط کرنش صفحه‌ای و خمش خالص ارائه داد [6]. زنـگ و هو(Zhang و Hu) به این نکته اشاره نمودنـد کـه اثـر بارگذاری سیکلی ماده و روش‌های محاسبه‌ی بازگـشت فنری بر مقدار تنش‌ها و تنش‌های باقیمانده بـسیار زیـاد مـی باشـد[7]. در همـین رابطـه گـو (Gau) براسـاس فرضیات مدل سخت شوندگی ایزوتروپ و سـینماتیکی و مدل سطح چندگانـه Mroz، مـدل جدیـدی را بـرای پـیش بینـی میـزان بازگـشت فنـری در بارگـذاری‌هـای پیچیده ارائه داد [8].

علاوه بر روش‌های تحلیلی، از روش‌های عددی و آزمایشگاهی نیز برای تعیـین میـزان بازگـشت فنـری استفاده شده است. با این حال، به کـارگیری روش‌هـای آزمایشگاهی جهت بررسی کلیه‌ی عوامل مؤثر بر میـزان بازگشت فنری، پر هزینه و گاهی بسیار دشوار است؛ لذا کاربرد روش‌های عددی بیش از پیش در حـال توسـعه می باشد. با بررسی تحقیقات انجام گرفته در سـال‌هـای اخیر به خوبی می‌توان دریافت کـه در میـان روش‌هـای عددی، روش‌های اجزای محدود (FEM) نقش عمده‌ای در مطالعه‌ی مسائل شکل دهی داشته‌انـد. بـا اسـتفاده از این روش‌ها، رفتار ماده و فرآیند تغییر شـکل تـا سـطح قابل قبولی شبیه سازی می‌شود. از این رو، به کـارگیری آن‌ها در زمان طراحی ابزار شکل دهی، هزینه‌ی تولید را به مقدار قابل توجهی کاهش می‌دهد. در دهه‌های اخیر، پیشرفت‌های قابل ملاحظه‌ای در زمینـه‌ی شـبیه سـازی عددی انواع فرآیندهای پیچیده‌ی شکل دهـی صـفحات نازک انجام شده است. از آن جمله، می‌تـوان بـه تحقیقـات زو (Zhou) و هم‌کارانش در جهت کاهش زمان محاسـبات و ابداع روشی به نام EBG (Element Bending Group) اشـاره نمـود[9]. در ایـن روش از المـان Membrane جهت محاسبه‌ی میزان برگشت پذیری استفاده می شود. پس از آن، سیریام(Siriam) و هم‌کارانش روش فـوق را در بررسی مسائل شکل دهی در حالت سه بعدی توسعه دادند [10]. با ایـن حـال، کـاربرد ایـن روش در تعیـین مقاومت خمشی صفحات و محاسبه‌ی میـزان بازگـشت فنری برای مسائل سه بعدی مناسب تشخیص داده نشد. در ادامـــه‌ی فعالیـــت‌هـــای یـــاد شـــده، پـــوربقراط (Pourboghrat) و هـم‌کـارانش از روش هیبریـدی بـا المـــان‌هـــای Membrane و Shell بـــرای محاســـبه‌ی بازگشت فنری در فراینـدهـای شـکل‌دهـی تحـت بـار متقارن محوری استفاده نمودند [11].

یکی از قطعاتی کـه در صـنعت شـکل‌دهـی و از جمله اتومبیل سازی بسیار مورد استفاده قرار مـی‌گیـرد،

قطعات U شکل می‌باشد. دو اثر نامطلوب بازگشت فنری و انحنای دیواره‌ی جانبی (Side – Wall Curl) بر بسیاری را متوجه رفع این اثرات نموده است. انحنای دیواره‌ی جانبی، پدیده‌ای است که نتیجه‌ی تغییر شکل پیچیده‌ی کشش، خمش و رها سازی آن‌ها می‌باشد و در دیواره‌ی قطعات تغییرشکل یافته رخ می‌دهد. مطالعات بسیاری در مورد چگونگی مدل سازی این نوع فرآیند شکل‌دهی و علل دو پدیده‌ی مذکور و عوامل مؤثر بر آن‌ها انجام گردیده است. ابتدا پوربقراط (Pourboghrat) و هم‌کارانش با استفاده از روش هیبریدی سعی در شبیه سازی این فرآیند به عمل آوردند [12,13]. متیسن (Mattiasson) نیز در سال ۱۹۹۵ فرآیند خمش به همراه کشش را برای مواد مختلف شبیه سازی کرد [14]. در سال‌های اخیر، لی (Li) و هم‌کارانش روشی را برای محاسبه‌ی بازگشت فنری براساس مدل اجزای محدود با استفاده از حل کننده‌ی دینامیکی ارائه دادند [15]. در نتیجه‌ی تحقیق، آن‌ها رابطه‌ای بین بازگشت فنری و برخی پارامترهای طراحی براساس مدل آماری آنالیز رگرسیون تعامدی تعیین گردید. در فعالیت‌هایی نزدیک به موضوع تحقیق جاری، ساموئل (Samuel) اثر شعاع پانچ، شعاع قالب و مقدار غیرایزوتروپی را بر میزان بازگشت فنری و انحنای دیواره بررسی نمود [16] . لیو(Liu) و هم‌کارانش نیز برای جبران کاهش انحنای دیواره‌ی جانبی و بازگشت فنری در خمش کششی قطعات U شکل، استفاده از نیروی نگهدارنده متغیر را پیشنهاد نمودند [17,18]. راگایی (Ragai) اثر مقدار غیر ایزوتروپی را در برگشت پذیری ورقه‌های فولاد ضد زنگ ٤١٠، به صورت آزمایشگاهی و شبیه سازی به روش اجزای محدود مورد بررسی قرار داد[19]. دان جوان(Dongjuan) با استفاده از یک روش تحلیلی، اثر روابط مختلف سخت شوندگی ماده و نیروی اصطکاک و نیروی نگهدارنده را بر میزان برگشت پذیری، مورد مطالعه قرار داد[20]. سان(Sun) با استفاده از یک سیستم کنترلی برای یک پرس هیدرولیکی کوچک، میزان برگشت پذیری را در خمش U شکل، اندازه گیری نمود[21]. هاما(Hama) از تکنیکی به نام (Nagata) در فرایند فرم دهی فلزات استفاده نمود و اثر دقت در مدل سازی ابزار قالب و پانچ را در شبیه سازی برگشت پذیری فولاد با استحکام بالا مورد بررسی قرار داد [22].

اگرچه فرآیند خمش- کشش دو بعدی، توسط بسیاری از محققین مورد بررسی قرار گرفته است، با این حال هنوز هم این زمینه از نقطه نظر پژوهشی باز می‌باشد و انجام هرگونه تحقیقی برای مدل‌سازی این فرآیند در صورت تطابق نتایج با داده‌های تجربی حائز اهمیت علمی و کاربردی فراوان خواهد بود. از آن‌جایی که فولادهای با استحکام بالا بسیار در صنعت به کار می‌روند و دارای برگشت پذیری‌های قابل ملاحظه‌ای می‌باشند، لذا در تحقیق جاری، این ماده به عنوان قطعه کار مورد تحلیل در خمش- کشش دو بعدی قرار گرفت. با توجه به نتایج انتشار یافته‌ی قبلی توسط سایر محققین، در این تحقیق از روش دینامیکی برای مدل‌سازی و شبیه سازی فرآیند بارگذاری و تلفیقی از روش‌های استاتیکی و دینامیکی برای فرآیند باربرداری استفاده شده است. هم‌چنین اثر بعضی از پارامترها نظیر ضریب اصطکاک و نیروی نگهدارنده بر میزان بازگشت فنری و انحنای دیواره‌ی جانبی، بررسی گردیده است.

چگونگی رفتار ماده و مدل مکانیکی

فولاد با استحکام بالا دارای سخت شوندگی کرنشی است و رابطه‌ی بین تنش مؤثر و کرنش پلاستیک به صورت ذیل تعریف می‌شود:

$$\sigma = K(\varepsilon_0 + \varepsilon_p)^n \qquad (٦)$$

در این معادله σ تنش مؤثر، K ضریب مقاومت ماده، ε_p کرنش پلاستیک، ε_0 ثابت تجربی و n توان کار سختی ماده است. رفتار ماده، ایزوتروپیک صفحه‌ای و غیر ایزوتروپیک نرمال فرض گردیده است که با پارامتر r به شکل ذیل تعریف می گردد:

$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} \qquad (٧)$$

اندیس‌های w و t به ترتیب نشان دهنده‌ی جهت عرض و ضخامت در صفحه می‌باشد. مقدار متوسط r عبارت است از:

$$R = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} \qquad (۸)$$

در این رابطه r_0، r_{45} و r_{90} به ترتیب مقادیر پارامتر r در جهت‌های صفر، چهل و پنج و نود درجه نسبت به جهت نورد صفحه است.

شبیه سازی فرآیند شکل دهی

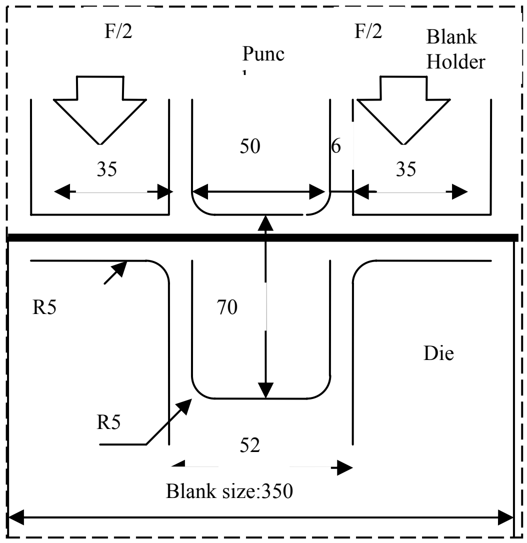
در شکل (۱) شماتیک مسأله‌ی خمش کششی و در شکل (۲) سه کمیت معرف بازگشت فنری و انحنای دیواره‌ی جانبی شامل θ_1، θ_2 و ρ نشان داده شده‌اند. نقطه‌ی C بر روی دیواره‌ی قطعه‌ی باربرداری شده قرار دارد و نشان دهنده‌ی چگونگی تغییرات انحنای دیواره است. در شکل (۳) علت ایجاد انحنا در دیواره‌ی جانبی پس از برداشتن قطعه از قالب در شکل نشان داده شده است. به دلیل شکل و هندسه‌ی مسئله‌ی مورد نظر می‌توان آن را به صورت کرنش صفحه‌ای تحلیل کرد و در این‌جا به علت تقارن مسأله، نیمی از آن مدل شده است.

در مسأله‌ی جاری ابتدا مدل هندسی مسأله ساخته می‌شود و سپس به تعریف موضوعات که عبارتند از: پانچ، قالب، نگهدارنده، ضلع بالای قطعه و ضلع پایین قطعه پرداخته می‌شود. در مرحله‌ی بعد، گروه‌های بارگذاری تعریف می‌شوند. در این مدل‌سازی، ۵ گروه بارگذاری (۲ گروه جهت بارگذاری و ۳ گروه جهت باربرداری) ایجاد شده است. این گروه‌ها عبارتند از :

الف: فرآیند بارگذاری نیروی نگهدارنده (Blank holder pressure) نگهدارنده به صورت جسم تغییر شکل پذیر مدل شده است و نیروی نگهدارنده به صورت یک بار فشاری بر سطح بالای آن اعمال می‌شود.

ب: نیروی پانچ (Punch movement). از تابع زیر برای جابه‌جایی پانچ استفاده گردیده است[23]:

$$u(t) = \frac{u(p)}{T_l}\left(t - \frac{T_l}{2\pi}\mathrm{Sin}\left(\frac{2\pi t}{T_l}\right)\right)$$

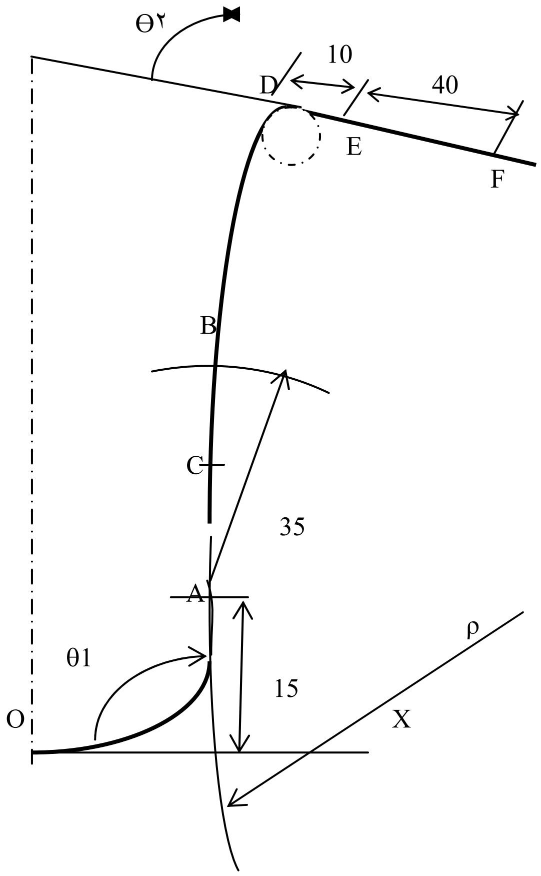


شکل ۱ شماتیک هندسه‌ی مسأله‌ی خمش کششی دو بعدی

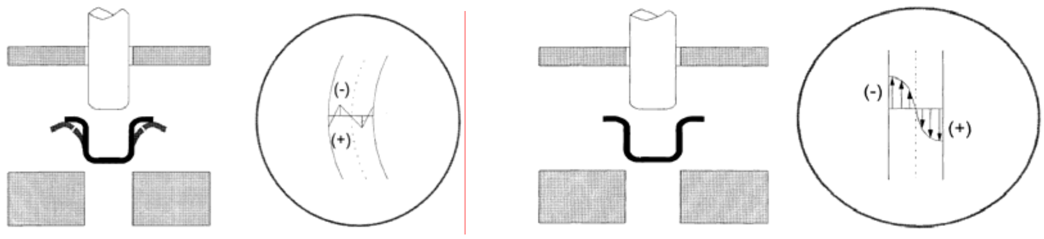
مزایای استفاده از تابع فوق، این است که در ابتدا و انتهای حرکت پانچ، شتاب صفر است و در نتیجه‌ی اثرات دینامیکی، شتاب مثبت و منفی کاهش می‌یابد. شبیه سازی فرآیند شکل دهی می‌تواند با زمان‌های مختلفی برای حرکت پانچ انجام شود، ولی از آن‌جا که زمان مورد نیاز برای آنالیز مسأله با زمان کل حرکت پانچ یعنی T_L متناسب است، مقدار آن باید تا حد ممکن کاهش یابد. زمان واقعی فرآیند قالب زنی، معمولاً یک دقیقه است که استفاده از آن باعث می شود زمان محاسبات زیاد گردد. معمولاً زمان شبیه سازی بین $۱۰^{-۱}$ تا $۱۰^{-٤}$ ثانیه انتخاب می شود.

در این مقاله کل زمان جابه‌جایی پانچ ۰/۰۱٤۵ s و سرعت جابه‌جایی ۵ m/s انتخاب شد که در نتیجه تابع جابه‌جایی پانچ به صورت زیر می باشد:

$$u(t) = \frac{70}{0.0145}\left(t - \frac{0.0145}{2\pi}\mathrm{Sin}\left(\frac{2\pi t}{0.0145}\right)\right)$$



شکل ۲ روش اندازه‌گیری سه کمیت معرف برگشت پذیری و انحناء دیواره‌ی جانبی شامل: θ_1 و θ_2 و ρ



الف   ب

شکل۳ چگونگی توزیع تنش در دیواره (الف) قبل از برگشت پذیری (ب) بعد از برگشت پذیری

تعیین میزان برگشت پذیری در فرآیندهای شکل دهی با دو روش امکان پذیر است. در روش اول ابزارها برداشته می‌شود و در هیچ گرهی تماسی وجـود نـدارد. این روش ظا هراً ساده بـه نظر مـی‌رسـد، ولـی بـرای جلوگیری از حرکت قطعه به صورت جسم صلب، لازم است تا شرایط مرزی جدیدی به قطعه کار اعمال شود.

روش دیگری که برای محاسبه‌ی برگشت پذیری مورد استفاده قرار می‌گیرد به این صورت است کـه بـه ابزار حرکتی در خلاف جهت شکل‌دهی اعمال می‌شود و محاسبات ادامه می یابد تا هـیچ تماسـی بـین ابـزار و قطعه کار وجود نداشته باشد.

در ایـن مقالـه، راه‌کـار دوم مـورد اسـتفاده قـرار

گرفت، بنابراین سه مرحله دیگر شامل بازگشت پانچ، حرکت نگهدارنده و آزاد سازی قطعه انجام گرفت.

ج: بازگشت پانچ (Punch-remove). حرکت پانچ ابتدا با سرعت پایین انجام می‌شود تا تماس پانچ با قطعه کار از بین برود و بعد از حذف تماس، سرعت بالاتری به پانچ داده می‌شود.

د: برداشتن نگهدارنده (Bholder-remove). در این مرحله نگهدارنده حرکت داده می شود و باعث ایجاد تغییر شکل مشهودی در قطعه کار می‌گردد.

ه: آزاد سازی قطعه کار (Ejection). در این مرحله قطعه کار کاملاً از قالب بیرون می‌آید، سپس نوع ماده (الاستیک- پلاستیک- ارتوتروپ و یا صلب) انتخاب می‌گردد و از میان معیارهای موجود، فن مایزز ارتوتروپ انتخاب می شود.

در این مقاله از فولاد با استحکام بالا برای جنس قطعه، مورد استفاده قرار گرفت. این فولادها غالباً به روش نورد تولید می شوند که حالت خاصی از غیر ایزوتروپی (ارتو تروپ) را دارا می باشند. با استفاده از تئوری هیل اگر مقدار غیر ایزو تروپی R و جهات: ۱و ۲ و۳، به ترتیب نشان دهنده‌ی طول و عرض و ضخامت ورق باشد، مقدار تنش تسلیم در جهات مختلف به صورت زیر خواهد بود [24]:

$$\sigma_{11} = \sigma_{22} = \sigma_Y$$

$$\sigma_{33} = \sigma_Y \sqrt{\frac{1+R}{2}}$$

$$\sigma_{12} = \sigma_{13} = \sigma_{23} = \frac{\sigma_Y}{\sqrt{3}}$$

برخی از خواص مورد نیاز در جدول (۱) نشان داده شده است. فرض می‌شود ماده دارای سخت شوندگی غیر خطی است و رابطه‌ی بین تنش مؤثر و کرنش پلاستیک به صورت ذیل تعریف می گردد:

$$\sigma = K(\varepsilon_0 + \varepsilon_P)^n$$

جدول ۱ خواص مورد نیاز قطعه

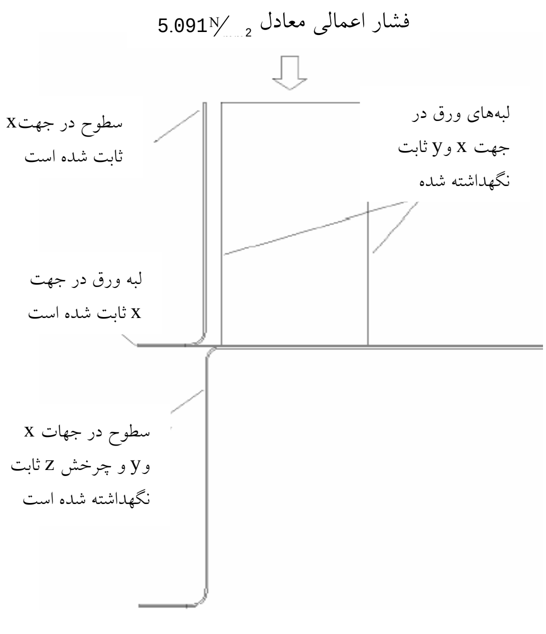
مدول یانگ	$206000\ N/mm^2$
ضریب پواسون	0.3
دانسیته	$7.8E\text{-}8\ kg/mm^3$
تنش تسلیم محوری	$261.6\ N/mm^2$
K	$680.61\ N/mm^2$
n	0.2182
ε_0	0.0125
R	1.66
ضخامت	2 mm

نگهدارنده به صورت ماده‌ی الاستیک مدل شده و قالب و پانچ به صورت جسم صلب مدل فرض گردیدند. در این جا جهت مش بندی قطعه، المان خطی ٤ ضلعی مورد استفاده قرار گرفت. برای این‌که نتایج مدل‌سازی دقت لازم را داشته باشد، اندازه‌ی المان برای قطعه ورق 0.2R (معادل ۱۷۵ المان) در طول ورق و ۳ المان در جهت ضخامت در نظر گرفته شد. برای قالب و پانچی که به صورت صلب در نظر گرفته شده است، در محل‌های خطی، ۱ المان در نظر گرفته شد، ولی در قسمت انحناء آن از آن‌جا که طبق مطالعات انجام شده تعداد المان‌ها بسیار مهم می باشد، برای هرانحناء، ۵ المان و در جهت ضخامت نیز ۱ المان انتخاب گردید. چون کمان دایره ای از دو انحناء تشکیل شده است، دارای ۱۰ المان می باشد. برای نگهدارنده، تعداد المان‌ها در ضلع افقی ۵ و در ضلع عمودی ۱۰ انتخاب شد.

نتایج به‌دست آمده و بررسی آن‌ها

نتایج شبیه سازی برگشت پذیری و انحنای دیواره. شکل (۵- الف) اولین مرحله‌ی بارگذاری، یعنی اعمال نیروی نگهدارنده را نشان می‌دهد. این نیرو بر ضلع بالایی نگهدارنده اعمال شده است. در شکل‌های (۵- ب) و (۵- پ) مراحل تغییر شکل قطعه در اثر اعمال نیروی پانچ مشاهده می‌گردد. همان طور که قبلاً اشاره شده، از حل کننده‌ی دینامیکی در فرآیند بارگذاری استفاده گردید، زیرا در این نوع حل کننده، می‌توان به صورت

مصنوعی سرعت پانچ را افزایش داد که در نتیجه زمان فرآیند شکل دهی نسبت به حل کننده استاتیکی بسیار کوتاه تر می‌شود. پس از تکمیل فرآیند بارگذاری برای تعیین شکل نهایی قطعه از روش بار برداری طبیعی استفاده شده است (به ابزار حرکتی در خلاف جهت حرکت شکل دهی اعمال می‌شود و محاسبات ادامه می‌یابد تا هیچ تماسی بین ابزار و قطعه کار وجود نداشته باشد). در شکل (۵- ت) مرحله‌ی بازگشت پانچ نشان داده شده است و در شکل‌های (۵- ث) و (۵- ج) عمل برداشت نگهدارنده انجام شده است. با جابه‌جایی نگهدارنده، قطعه اجازه‌ی تغییر شکل پیدا می‌کند که در نهایت در شکل (۵- چ) مرحله آزادسازی قطعه کار نمایش داده شده است. در جدول زیر نتایج مدل سازی با نتایج تجربی ارائه شده در کنفرانس شکل دهی ۹۵ NUMFORM [14] مقایسه گردیده است.



شکل ٤ مدل ساخته شده و شرایط مرزی اعمال شده به مدل

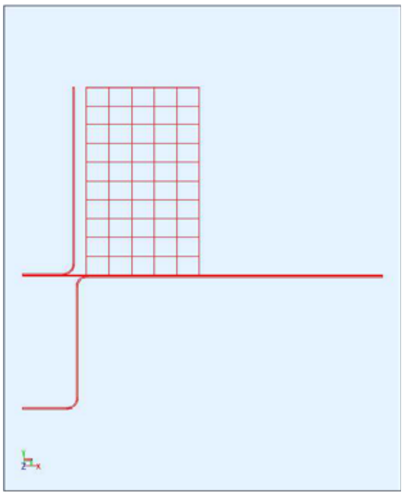
جدول ۲ مقایسه نتایج مدل سازی برگشت پذیری و انحناء دیواره

Result	θ_1	θ_2	P
Experimental (NUMIFORM95 [14])	101.8	80.4	181.8
This study	96.665	82.41	202.6

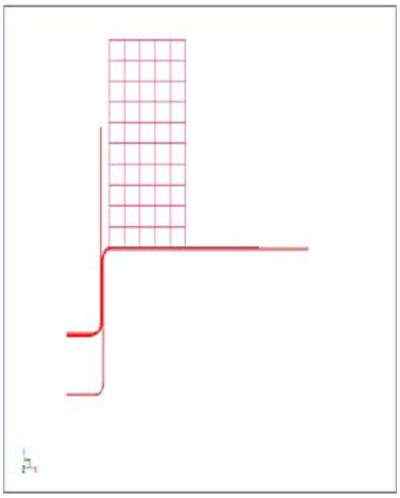
اثر ضریب اصطکاک بر میزان بازگشت فنری و انحنای دیواره

تأثیر اثر ضریب اصطکاک بر میزان بازگشت فنری و انحنای دیواره در شکل‌های (٦) و (٧) نشان داده شده است. چنانچه از نتایج به دست آمده ملاحظه می‌گردد، در مقادیر کوچک ضریب اصطکاک، با افزایش ضریب اصطکاک، به تدریج میزان برگشت پذیری نیز افزایش می‌یابد. با این حال با عبور ضریب اصطکاک از مقادیر معینی (μ =0.15) بازگشت فنری شروع به کاهش می‌کند که در مقایسه با افزایش قبلی آن، روند کندتری دارد. با ملاحظه‌ی شکل (۷)، روشن می‌گردد که شعاع انحنا در دیواره‌ی خمش (نقطه‌ی C در شکل (۲)) نیز از روند مشابهی پیروی می‌کند و مطابق با تغییرات در میزان بازگشت فنری در قطعه کار، دچار افزایش می‌شود که این نتیجه با هندسه‌ی قطعه‌ی نهائی نیز سازگار می باشد. بنابراین به منظور کاهش پدیده‌ی ناخواسته‌ی بازگشت فنری، در مواردی که کاهش ضریب اصطکاک به مقادیر خیلی کوچک امکان پذیر نباشد، با افزایش ضریب اصطکاک می توان آن را تا حدودی کاهش داد. در توجیه علت فرآیند فوق، می‌توان به ترتیب ذیل استدلال کرد:

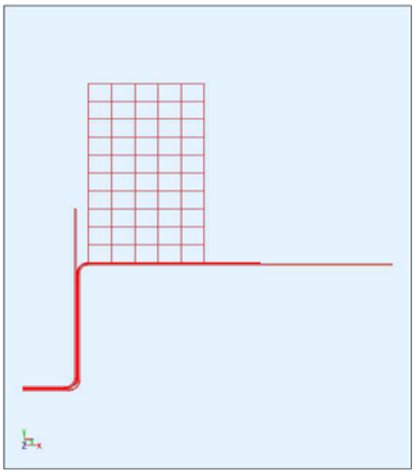
در ابتدا با افزایش ضریب اصطکاک، نیروهای غشایی- کششی ایجاد شده در قطعه، سبب محدود تر شدن منطقه‌ی پلاستیک حاصل بر روی قطعه کار می‌گردد که به دلیل خمش قطعه و تنش‌های فشاری ایجاد شده است. با افزایش ضریب اصطکاک، تنش‌های غشایی- کششی حاصل از اصطکاک توسعه می‌یابد و با گسترش منطقه‌ی پلاستیک، کاهش بازگشت فنری اتفاق خواهد افتاد.



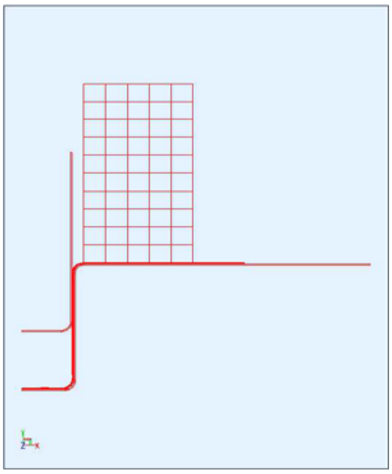
شکل ۵- الف



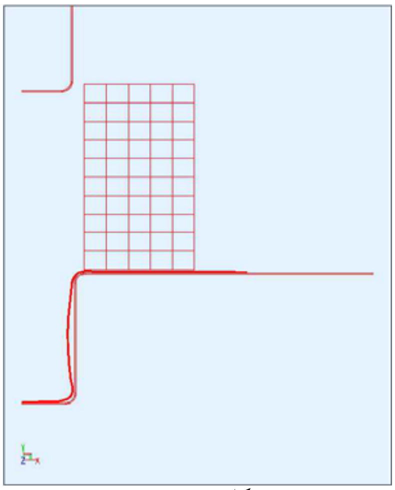
شکل ۵- ب



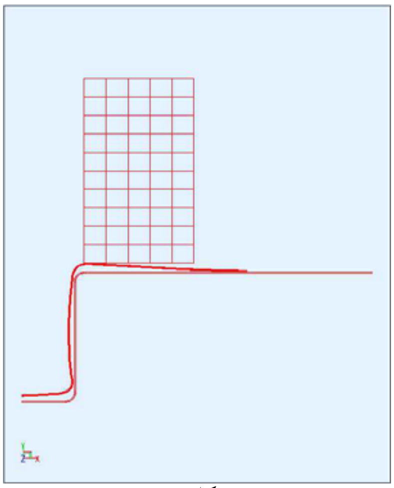
شکل ۵- پ



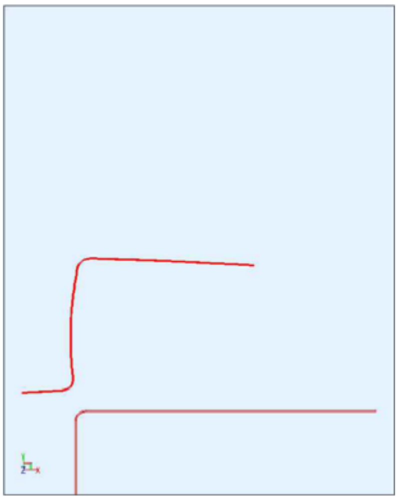
شکل ۵- ت



شکل ۵- ث

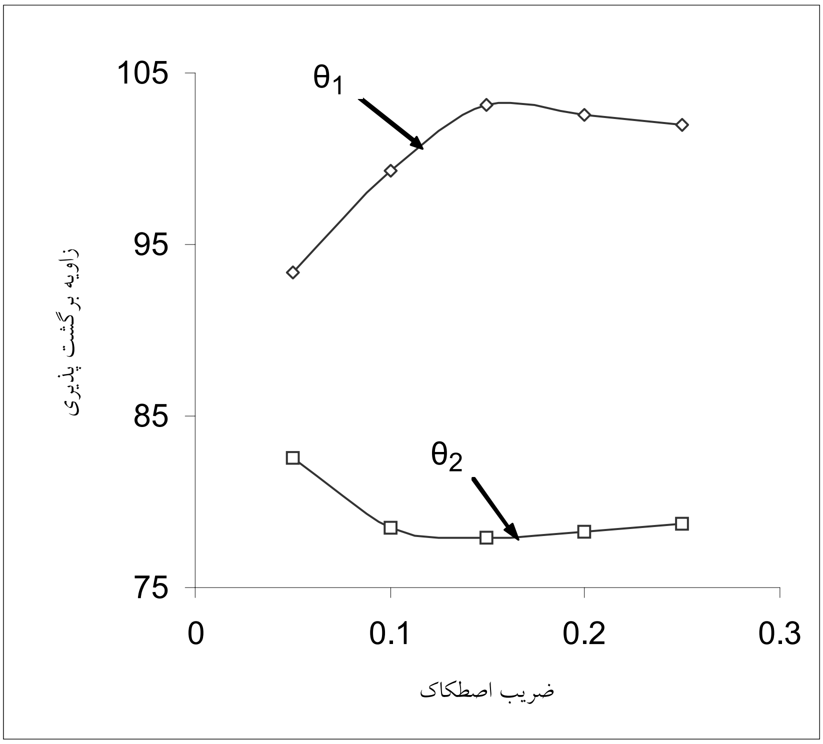


شکل ۵- ج

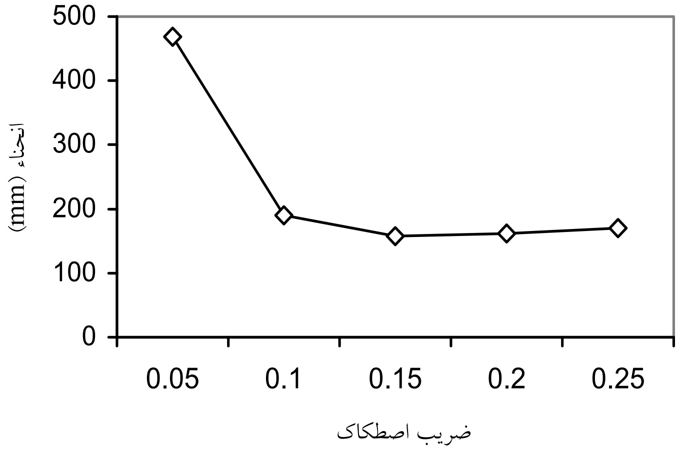


شکل ۵- چ

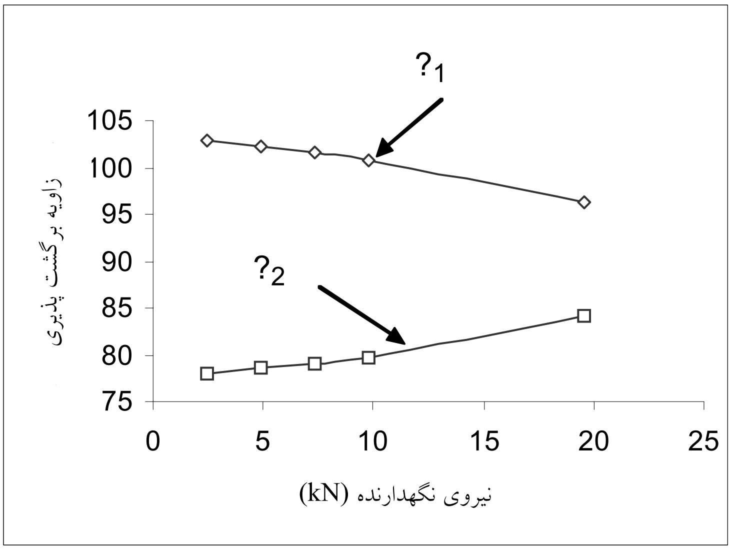
شکل ۵ فرآیند بارگذاری و باربرداری: الف) اعمال نیروی نگهدارنده (مرحله‌ی اول)، ب) اعمال نیروی پانچ (مرحله‌ی دوم)، پ) انتهای حرکت پانچ (مرحله‌ی دوم)، ت) بازگشت پانچ (مرحله‌ی سوم)، ث) برداشت نگهدارنده (مرحله‌ی چهارم)، ج) انتهای حرکت نگهدارنده (مرحله‌ی چهارم)، چ) پس از باربرداری نهایی (مرحله‌ی پنجم).



شکل ٦ تغییرات زاویه‌های برگشت پذیری θ_1 و θ_2 نسبت به ضریب اصطکاک



شکل ۷ نمودار تغییرات انحنا نسبت به ضریب اصطکاک



شکل ۸ تغییرات زاویه‌های برگشت پذیری θ_1 و θ_2 نسبت به نیروی نگهدارنده

اثر نیروی نگهدارنده بر میزان برگشت فنری و انحنای دیواره

از آن‌جا که با افزایش نیروی نگهدارنده نیروهای غشایی- کششی در ورق افزایش می‌یابد، روند کاهشی برای مقدار بازگشت فنری رخ خواهد داد. استدلال ذکر شده در بخش قبل مبنی برچگونگی افزایش منطقه‌ی پلاستیک به دلیل غلبه یافتن نیروهای غشایی-کششی در این‌جا نیز کاملاً معتبر و قابل استناد می‌باشد.

چنان که می‌دانیم، میزان بازگشت فنری در یک قطعه‌ی تحت تغییر شکل الاستیک- پلاستیک رابطه‌ی مستقیمی با محدوده‌ی منطقه‌ی پلاستیک دارد. بدین ترتیب که هرچه این منطقه گسترش یافته‌تر و سطح تنش‌ها بالاتر باشد، مقدار بازگشت فنری در قطعه کاهش خواهد یافت؛ اما از آن‌جا که سطح تنش مؤثر خود تابعی از کرنش مؤثر است، مشاهده‌ی تغییرات کرنش نسبت به مقدار نیروی نگهدارنده می‌تواند به روشن‌تر شدن نتایج نشان داده شده در شکل (۸) منجر گردد.

شکل (۹) تغییرات کرنش مؤثر در کف قطعه کار (در راستای نصف النهاری) نسبت به فاصله‌ی آن از مرکز ورق را نشان می‌دهد که برای دو نیروی

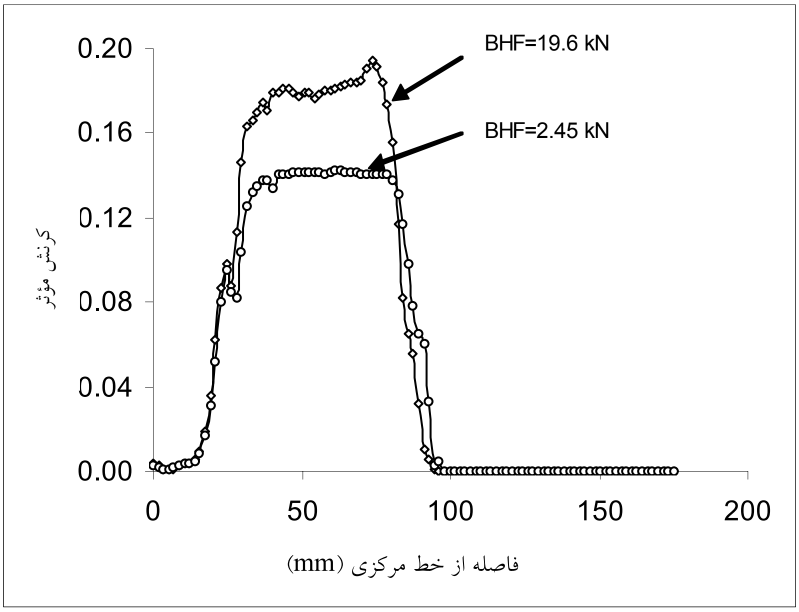
نگهدارنده‌ی متفاوت رسم شده است.

به‌طور کلی می‌توان مشاهده نمود که با نیروی نگهدارنده‌ی بالاتر، کرنش مؤثر بیشتری در دیواره‌ی ورق ایجاد می‌گردد که این نتیجه در راستای نتایج اخذ شده از شکل (۸) می‌باشد و در حقیقت نشان دهنده‌ی درستی استدلال صورت گرفته در بخش پیشین است. با وجود این، بین فاصله‌ی ۸۳ تا ۹۸ میلی‌متر (در منطقه‌ی گوشه‌ی بالایی ورق) روند متفاوتی ملاحظه می‌گردد؛ بدین صورت که با اعمال نیروی نگهدارنده‌ی بزرگ‌تر (۱۹/٦ کیلو نیوتن) کشش بیشتری در منطقه‌ی ذکر شده رخ خواهد داد. این بار کششی در حالی بر روی ورق قرار گرفته است که ورق هنوز تحت تنش‌های فشاری ناشی ازخمش می‌باشد؛ لذا در این قسمت و به صورت محلی، تنش‌های غشایی- کششی، منطقه‌ی پلاستیک را کاهش داده است.

نتیجه گیری

خمش U شکل الاستیک- پلاستیک ورق‌های غیر ایزوتروپیک در حالت کرنش صفحه‌ای مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. پدیده‌های ناخواسته‌ای مانند بازگشت فنری و انحناء دیواره‌ی عمودی که در شکل دهی ورق‌های نازک ایجاد می‌گردند، مورد بررسی واقع شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهند که افزایش ضریب اصطکاک بین قطعه کار و سطوح تماس، تا مقادیر معینی سبب افزایش بازگشت فنری می‌گردد و پس از آن، بازگشت فنری و انحناء دیواره‌ی عمودی را کاهش خواهد داد. نیروی اعمال شده از طرف نگهدارنده‌ها بر ورق نیز تأثیر نسبتاً مشابهی را نشان می‌دهد؛ لذا می‌توان با انتخاب مقادیر مناسبی برای ضریب اصطکاک و نیروی نگهدارنده‌ها، پدیده‌های ناخواسته‌ای مانند بازگشت فنری و انحناء دیواره‌ی عمودی را به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش داد. به نظر می‌رسد نتایج به‌دست آمده دارای کاربردهای عملی قابل توجهی در شکل‌دهی ورق‌های نازک فلزی باشند.

قدردانی. از هم‌کاری دپارتمان مکانیک دانشگاه سوانزی انگلستان به دلیل در اختیار قرار دادن نرم افزار ELFEN [25] در هنگام انجام این تحقیق، تشکر و سپاسگزاری می‌گردد.



شکل ۹ تغییرات کرنش مؤثر در پایین ورق نسبت به فاصله از خط مرکزی آن

مراجع

1. Gardiner, F.J., "The springback of metals", Trans. ASME, 79, pp. 1-9, (1957).
2. Johnson, W., and Yu, T.X., "Influence of axial force on the elastic-plastic bending and springback of a beam", *J. Mech. Work. Technol*. 6, pp. 5-21, (1982).
3. Johnson, W., and Yu, T.X., "On springback after the pure bending of beams and plates of elastic work hardening material", *Int. J. Mech. Sci.*, 23, pp. 687-696, (1981).
4. Yu, T.X., and Zhang, L.C., "Plastic Bending; Theory and Applications", World Scientific Publishing Co. Ltd, Singapore, (1996).
5. Yuen, W.Y.D., "A generalized solution for the prediction of springback in laminated strip", *J. Mats. Proc. Tech.*, 61, pp. 254-264, (1996).
6. Leu, Daw-Kwei., "A simplified approach for evaluating bend ability and springback in plastic bending of anisotropic sheet metals", *J. Mats. Proc. Tech.*, 66, pp. 9-17, (1997).
7. Zhang, Z.T., and Hu, S.J., "Stress and Residual stress distributions in plane strain bending", *Int. J. Mech. Sci.*, 40, pp. 533-543, (1998).
8. Gau, J.T., and Kinzel, G.L., "An experimental investigation of the influence of the Bauschinger effect on springback prediction", *J. Mats. Proc. Tech.*, 108, pp. 369-375, (2001).
9. Zhou, D., Sriram, S., Jinka, A., and Wagoner, R.H., "Bending and springback using membrane elements", *Vol. 75, Engineering Systems Design and Analysis,* Vol. 3, New York, ASME, pp.135-142, (1996).
10. Siriram, S., and Wagoner, R.H., "Adding bending stiffness to 3-D membrane FEM programs", *Int. J. Mech. Sci.*, 42, pp. 1753-1782, (2000).
11. Pourboghrat, F., Karabin, M., Becker, R., and Chung, K., "A hybrid membrane/shell method for calculating springback of anisotropic sheet metals undergoing axisymmetric loading", *Int. J. Plasticity,* 16, pp. 677-700, (2000).
12. Pourboghrat, F., and Chu, E., "Springback in plane strain stretch/draw sheet forming", *Int. J. Mech. Sci.*, 36(3), pp. 327-341, (1995a).
13. Pourboghrat, F., and Chu, E., "Prediction of springback and side wall curl in 2-D darw bending", *J. Mats. Proc. Tech.*, 50, pp. 361-374, (1995b).
14. Mattiasson, K., Strange, A., Thilderkvist, P., and Samuelsson, A., "Simulation of springback in sheet metal forming", NUMIFORM 95, pp. 115-124, (1995).
15. Li, G.Y., Tan, M.J., and Liew, K.M., "Springback analysis for sheet forming processes by explicit finite element method in conjunction with the orthogonal regression analysis", *Int. J. Solid Struc*., 36, pp. 4653-4668, (1999).

16. Samuel, M., "Experimental and numerical prediction of springback and side wall curl in U-bending of anisotropic sheet metals", *J. Mats. Proc. Tech*., 105, pp. 382-393, (2000).

17. Liu, G., Lin, Z., Xu, W., and Bao, Y., "Variable blank holder force in U-shaped part forming for eliminating springback error", *J. Mats. Proc. Tech.*, 120, pp. 259-264, (2002).

18. Liu, G., Lin, Z., and Bao, Y., "Improving dimensional accuracy of a U-shaped part through an orthogonal design experiment", Finite Element. Anal . Des ., 39(2), PP.116-127,(2005).

19. Ragai, I., Lazim, D., and Nemes, A., "Anisotropy and springback in draw-bending of stainless steel 410: experimental and numerical study", *J. Mats. Proc. Tech.*, 166, pp. 116-127, (2005).

20. Dongjuan, Z., Zhenshan, C., Xueyu, R., and Yuqiang, L.," An analytical model for predicting springback and side wall curl of sheet after U-bending". Comp. Mats Sci.38,pp 707-715, (2007).

21. Sun, P., Gracio, J.J., and Ferreira, J.A.,"Control system of a mini hydraulic press for evaluating springback in sheet metal forming". *J. Mats. Proc. Tech.*, 176, pp. 55-61, (2006).

22. Hama, T., Nagata, T., Teodosiu, C., Makinouchi, A., and Takuda, H., "Finite-element simulation of springback in sheet metal forming using local interpolation for tool surfaces". *Int. J. Mech. Sci*., 50(2), pp.175-192, (2008).

23. Apostolos, P., Karafillis, M. and Boyce, C., "Tooling and binder design for sheet metal forming processes compensating springback error", *Int. J. Mach. Tools Manufact*., 36(4), pp. 503-526, (1996).

24. Hill, R., *"The Mathematical Theory of Plasticity"*, The Oxford University Press, Oxford, London, pp. 729-734, (1985).

25. ELFEN Level 3.0.03., "*Manual and worked examples",* Rockfield software Ltd., University of Wales Swansea, Swansea, (1998).